



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**VYUŽITÍ ODPADNÍHO TEPLA Z PROCESŮ POMOCÍ
TEPELNÝCH ČERPADEL**

WASTE HEAT RECOVERY FROM PROCESSES USING HEAT PUMPS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Marada

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Havlásek

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Petr Marada**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Martin Havlásek**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Využití odpadního tepla z procesů pomocí tepelných čerpadel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V průmyslové sféře je běžné, že se zbytkové teplo z procesů odvádí jako odpadní proud v kapalně či plynné formě. Tento proud je ovšem velmi často nosičem velkého množství tepla, které je možné efektivně využít pomocí vhodných technologií, jako jsou například tepelné výměníky nebo tepelná čerpadla. Lze tím dosáhnout úspory paliv i energií, a zlepšit tak ekonomiku provozu. Dalším významným přínosem využívání odpadního tepla je redukce emisí nežádoucích látek, která přispívá k ochraně přírodních zdrojů i životního prostředí.

Cíle bakalářské práce:

Základní rešerše odpadního tepla
Rešerše tepelných čerpadel
Teoretický výpočet zvoleného parametru tepelného čerpadla
Experiment

Seznam literatury:

BCS Incorporated (2008): Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry, prepared for the U.S. Department of Energy, Industrial Technologies Program.

Industrial Energy Division: Waste Heat Recovery, Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada.

Mračková, A. (2008): Návrh a optimalizace tepelného čerpadla pro mateřskou školu. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 70 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je popsat možnosti využití odpadního tepla z procesů pomocí tepelných čerpadel. První část definuje pojem odpadní teplo a zabývá se druhy tepla, možnostmi a způsoby jeho využití. V další části jsou popsány různé druhy tepelných čerpadel, jeho součásti a také zdroje, ze kterých je možné teplo čerpat. Poslední část ukazuje výpočet návratnosti investice do tepelného čerpadla při vytápění administrativní budovy.

KLÍČOVÁ SLOVA

Odpadní teplo, tepelné čerpadlo, výměník tepla, Organický Rankinův cyklus, topný faktor, zdroj tepla

ABSTRACT

The aim of the bachelor thesis is to describe the possibilities of using waste heat from the processes by heat pumps. The first part defines the waste heat and deals with the possibilities and ways of its use. The next section describes the different types of heat pumps, their components and sources from which it is possible to draw the heat. The last part shows the calculation of return on investment to make heat pump for heating office buildings.

KEYWORDS

Waste heat, heat pump, heat exchanger, Organic Rankine Cycle, coefficient of performance, heat source

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MARADA, P. *Využití odpadního tepla z procesů pomocí tepelných čerpadel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Havlásek.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Využití odpadního tepla z procesů pomocí tepelných čerpadel* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Havlásky a s použitím uvedené literatury.

V Brně dne 26. května 2017

.....

Petr Marada

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práci Ing. Martinu Havláskovi za vstřícný přístup, cenné rady a připomínky, které mi dopomohly k dokončení této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval celé rodině a mé přítelkyni za podporu během studia.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	11
1. ÚVOD.....	12
2. ODPADNÍ TEPLA	13
2.1 DRUHY ODPADNÍHO TEPLA.....	13
2.1.1 Nízkopotenciální teplo	14
2.1.2 Středněpotenciální teplo.....	15
2.1.3 Vysokopotenciální teplo	16
2.2 VYUŽITELNOST ODPADNÍHO TEPLA	16
2.2.1 Množství odpadního tepla	17
2.2.2 Teplota odpadního tepla.....	17
2.2.3 Chemické složení odpadního proudu	17
2.2.4 Cena, dostupnost a další faktory	18
2.3 MOŽNOSTI VYUŽITÍ	19
2.4 METODY VYUŽITÍ ODPADNÍHO TEPLA.....	19
2.4.1 Tepelné výměníky	20
2.4.2 Tepelná čerpadla.....	23
2.4.3 ORC jednotky	23
2.4.4 Tepelné trubice.....	24
2.4.5 Termoelektrické generátory.....	24
3. TEPELNÉ ČERPADLO	25
3.1 PARAMETRY TEPELNÉHO ČERPADLA	25
3.1.1 Topný faktor TČ.....	25
3.1.2 Skutečný topný faktor TČ	26
3.1.3 Chladicí faktor TČ.....	26
3.2 DRUHY TEPELNÝCH ČERPADEL	26
3.2.1 Kompresorová TČ	26
3.2.2 Absorpční TČ	27
3.2.3 Plynová TČ.....	28
3.2.4 Hybridní TČ	28
3.3 ČÁSTI KOMPRESOROVÉHO TČ	29
3.3.1 Výparník	29
3.3.2 Kompresor.....	29
3.3.3 Kondenzátor	30
3.3.4 Expanzní ventil.....	30
3.4 ZDROJE NÍZKOPOTENCIÁLNÍHO TEPLA PRO TČ	30
3.4.1 Teplo podloží.....	31
3.4.2 Půdní vrstva	32
3.4.3 Venkovní vzduch	32
3.4.4 Vnitřní vzduch	33
3.4.5 Povrchová voda.....	33
3.4.6 Podzemní voda	34

4. VÝPOČET TEPELNÉHO ČERPADLA	35
4.1 PROCENTO POKRYTÍ Z CELKOVÉ SPOTŘEBY TEPELNÝM ČERPADLEM	35
4.2 NÁVRATNOST PRO RŮZNÉ COP	35
4.3 NÁVRATNOST PRO RŮZNÉ PRACOVNÍ DOBY	37
4.4 NÁVRATNOST PRO RŮZNÉ POŘIZOVACÍ CENY	38
4.5 NÁVRATNOST PRO RŮZNÉ CENY ELEKTRICKÉ ENERGIE	39
4.6 NÁVRATNOST PRO RŮZNÉ CENY TEPLÉ VODY	40
4.7 VYHODNOCENÍ VÝPOČTŮ	41
5. ZÁVĚR.....	42
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	43
SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ	46

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Symbol	Význam	Jednotka
A_{aux}	energie dodaná pro pohon pomocných zařízení	[J]
A_c	energie dodaná pro pohon kompresoru	[J]
A_0	energie dodaná pro pohon tepelného čerpadla	[J]
C_{el}	cena elektrické energie	[Kč]
C_{TUV}	cena teplé vody	[Kč]
COP	coefficient of performance, topný faktor	[-]
d	provozní hodiny	[hod/rok]
\dot{E}	ztráty odpadního tepla	[W/s]
$h(t)$	měrná entalpie v závislosti na teplotě	[J]
\dot{m}	hmotnostní tok odpadního proudu	[kg/s]
N_i	pořizovací cena	[Kč]
P	výkon TČ	[kW]
$P_{TČ}$	procento pokrytí z celkové spotřeby TČ	[%]
Q_c	odvedené teplo	[J]
Q_H	teplo získané pro vytápění	[J]
Q_o	roční spotřeba tepla	[GJ]
$Q_{TČ}$	teplo vyrobené tepelným čerpadlem	[GJ]
T	návratnost investice	[rok]
T_c	teplota, při které dochází k odpařování chladiva v cyklu	[K]
T_H	teplota, při které dochází ke kondenzaci chladiva v cyklu	[K]
Z_{cel}	roční zisk	[Kč]
Z_{el}	náklady na elektrickou energii	[Kč]
$Z_{QTČ}$	zisk z tepla	[Kč]
ε_c	chladicí faktor	[-]
ε_H	topný faktor	[-]
ε_{Hg}	skutečný topný faktor	[-]
η_t	účinnost termodynamického cyklu	[-]
ČOV	čistírna odpadních vod	
ORC	Organický Rankinův Cyklus	
TČ	tepelné čerpadlo	

1. Úvod

V průmyslové sféře je běžné, že se zbytkové teplo z procesů odvádí jako proud v kapalně nebo plynné formě. Tento proud je ovšem velmi často nosičem velkého množství tepla, které je možné efektivně využít pomocí vhodných technologií. Tím lze dosáhnout úspory paliv i energií, a zlepšit tak ekonomiku provozu. Celková spotřeba energie ve všech průmyslových odvětvích na území České republiky činila za rok 2014 asi 87 TWh, z čehož asi 20 až 50 % této energie nebylo využito [1]. Dalším významným přínosem využívání odpadního tepla je redukce emisí nežádoucích látek, která přispívá k ochraně přírodních zdrojů i životního prostředí.

Za posledních několik let mnoho průmyslových podniků začalo odpadní teplo využívat. Jednou z technologií využívajících odpadní teplo jsou tepelná čerpadla (dále jen TČ), která jsou vhodná jak pro využití v průmyslu, tak v domácnosti. Statistiky ministerstva průmyslu a obchodu z roku 2014 ukazují, že oblíbenost tepelných čerpadel každým rokem roste. Zatímco do roku 2004 bylo na český trh dodáno asi 6 500 kusů, téměř totožný počet mířil na trh v roce 2010 [2]. V současnosti počet tepelných čerpadel různých výkonů v České republice přesahuje 70 000. Je jasné, že tento počet bude dále rychle stoupat, jelikož každá sedmá novostavba je v dnešní době vybavena TČ [3].

Jedním z hlavních důvodů tohoto růstu je, že majitel nemusí nakoupit až 70% energie pro vytápění a ohřev vody, jelikož je tato energie přivedena bezplatně z okolí domu. Tato skutečnost se projeví vysokými úsporami ve srovnání s domácnostmi, které používají klasické kotle na různé druhy paliva. Dalším výhodou je naprosto bezobslužný a pohodový provoz. Jelikož TČ snižuje spotřebu paliv a tím i emise, jenž se podílí na vzniku klimatických změn, je možné získat dotaci na jeho instalaci.

2. Odpadní teplo

Pojem odpadní teplo představuje energii jako vedlejší produkt při různých procesech v důsledku nedokonalostí a termodynamických limitů různých zařízení. Je obsaženo v nejrůznějších odpadních proudech (spaliny, chladicí voda, horký vzduch viz obr. 1). Jak už jeho název napovídá, jde o teplo zmařené v průmyslových procesech, které většinou uniká do okolí a není žádným způsobem využito. Toto teplo je generováno ve většině odvětví a nemělo by být vnímáno jako nutné zlo, nýbrž jako možnost k úspoře. Hlavními zdroji odpadního tepla jsou kombinované výroby elektřiny a tepla, spalovny odpadů, energeticky náročná průmyslová odvětví (chemický a petrochemický průmysl, hutnictví železa a neželezných kovů, průmysl stavebních hmot, papírenství apod.), geotermální pole, zařízení na energetické využití biomasy a sluneční záření. Jedná se tedy o tzv. druhotný energetický zdroj, který vzniká jako vedlejší produkt technologické výroby, nebo jiné lidské činnosti. Díky využívání odpadního tepla, skrývajícího v sobě velký potenciál, je možné dosáhnout velkých finančních úspor a zároveň přispět k ochraně životního prostředí.



Obr. 1 Vytápění skleníku odpadním teplem [4]

2.1 Druhy odpadního tepla

Odpadní teplo se na základě jeho potenciálu rozděluje do třech základních tříd: nízkopotenciální, středněpotenciální a vysokopotenciální. Toto rozdělení vychází z teploty média při výstupu z procesu. Mnohé zdroje uvádějí různé hraniční teploty, proto nemusí být rozdělení do tříd jednoznačné. Každý druh odpadního proudu je vhodný na jiný způsob využití, proto je třeba nejprve zvážit, zda je zdroj odpadního tepla vhodný pro požadované využití (viz tab. 1).

Tab. 1 Rozdělení zdrojů tepla dle potenciálu [5], [6]

Potenciál tepla	Zdroje tepla	Teplota [°C]	Možné způsoby využití
Vysoký (>650 °C)	Šachtové pece na nikl Elektrická oblouková pec Kyslíkový LD konvertor Kelímkové pece na hliník Šachtové pece na měď Kalicí pece Kelímkové pece na měď Výroba vodíku Výpary ze spalovny Sklářské pece Koksovací pece	1370-1650 1370-1650 1200 1100-1200 760-820 930-1040 900-1090 650-980 650-1430 1300-1540 650-1000	Přehehřev spalovacího vzduchu Výroba elektřiny Transfer na střední teplotu a následné využití Přehehřev vsázek do pecí
Střední (230-650 °C)	Výfuky parního kotle Výfukové plyny turbín Pece pro tepelnou úpravu Sušící a vytvrzovací pece Cementářská pec Výfukové plyny pístového motoru	260-380 370-540 430-650 260-590 450-620 320-590	Přehehřev spalovacího vzduchu Výroba elektřiny Přehehřev dalších pecí Přehehřev napájecí vody Využití v nízko teplotních procesech Výroba elektřiny pomocí ORC
Nízký (<230 °C)	Spaliny plynových bojlerů Proces parního kondenzátu Chladicí voda z: Žíhacích pecí Vzduchových kompresorů Motorů s vnitřním spalováním Chladících zařízení klimatizačních zařízení Sušící, pečící, vytvrzovací pece Horké procesní tekutiny Odpadní voda z ČOV	70-260 50-90 70-260 30-50 70-120 30-40 90-240 30-230 20-35	Ohřev prostor, vody Zvýšení teploty tepelnými čerpadly a následné využití Organický Rankinův cyklus

2.1.1 Nízkopotenciální teplo

Odpadní proud, jehož teplota se pohybuje mezi teplotou okolí až do 230 °C [6], se nazývá nízkopotenciální. Toto teplo zaujímá okolo 50 % [1] z celkového objemu odpadního tepla, tudíž se jedná o nejčastěji se vyskytující formu odpadních proudů z průmyslu (spaliny strojů, vzduch ze sušících a vytvrzovacích pecí viz obr. 2). A jelikož ho z těchto zdrojů uniká tak velké množství, je nezbytné jej co nejvíce využívat. Nevýhodou je nízká teplota těchto odpadních proudů, proto vzhledem k menšímu počtu zařízení, schopných nízkoteplotní proud využít, klesá jejich využitelnost.



Obr. 2 Vytvrzovací pec [7]

2.1.2 Středněpotenciální teplo

Teplota středněpotenciálního odpadního tepla se pohybuje v rozmezí 230 až 650 °C [6]. Nejčastěji jde o výfukové plyny z různých strojů, ať už z motorů nebo kotlů a pecí na povrchovou úpravu (cementace, nitridace viz obr. 3). Do této třídy je možné také zahrnout některé zdroje, disponující teplotou na pomezí vysokopotenciálního tepla, které se ale kvůli ztrátám dostane do třídy se středním potenciálem.



Obr. 3 Nitridační pec [8]

2.1.3 Vysokopotenciální teplo

Do této třídy spadají většinou pece na výrobu kovů (viz obr. 4), dosahující teplot i přes 1500 °C (viz tab. 1). Toto teplo má sice obrovský potenciál, ale většinou jsou v proudu obsaženy různé nečistoty, které teplo znehodnocují a snižují možnost jeho využití [6]. V některých případech je toto teplo lehce ochlazeno a teprve poté využíváno.



Obr. 4 Elektrická oblouková pec [9]

2.2 Využitelnost odpadního tepla

Před využitím odpadního tepla je nutné zvážit všechny faktory ovlivňující možnost a způsob jeho využití. Ne každý odpadní proud je vhodný pro využití danou technologií. Proto před návrhem postupu využití odpadního tepla je třeba zvážit tyto rozhodující faktory [6]:

1. Množství odpadního tepla
2. Teplota odpadního tepla
3. Chemické složení odpadního proudu
4. Pořizovací cena a další náklady
5. Dostupnost zdroje tepla a další faktory

2.2.1 Množství odpadního tepla

Množství, nebo výhřevnost, je měřítkem toho, kolik energie je obsaženo v proudu odpadního tepla. Množství odpadního tepla obsažené v proudu je funkcí teploty a hmotnostního toku [6]:

$$\dot{E} = \dot{m} \cdot h(t) \quad (2.1)$$

kde

\dot{E} ztráty odpadního tepla [W/s]

\dot{m} hmotnostní tok odpadního proudu [kg/s]

$h(t)$měrná entalpie v závislosti na teplotě [J]

I když je množství odpadního tepla, důležitou informací, je nutné také zohlednit další charakteristiky proudu, a to hlavně teplotu, která je pro využitelnost nejdůležitějším faktorem.

2.2.2 Teplota odpadního tepla

Teplota při výrobě kovů dosahuje hodnot okolo 1300 °C, naopak chladicí voda vzduchových kompresorů má teplotu řádově v desítkách stupňů Celsia. Je tedy zřejmé, že teploty různých proudů jsou diametrálně odlišné a je třeba na ně brát ohled při volbě materiálu tepelných výměníků, které budou použity pro vedení tepla. Uhlíkové oceli oxidují nad teplotou 425°C, korozivzdorné oceli nad teplotou 650°C. Proto je při práci s vyššími teplotami nutné použití slitin nebo kompozitů. Kovové materiály se obvykle nepoužívají nad teplotou 871 °C. Alternativou mohou být keramické materiály, které vydrží velmi vysoké teploty. Případně je možné odpadní proud ochladit a teprve pak jej využít [6]. Při nesprávné volbě materiálu může dojít k nehodě a ke škodě na celé soustavě.

2.2.3 Chemické složení odpadního proudu

Důležitým faktorem pro výběr materiálu soustavy a technologie využití je chemické složení odpadního proudu. Toto složení značně ovlivňuje například tepelnou vodivost nebo tepelnou kapacitu a tím i možnosti využití tepla. Tepelný přenos může být také ovlivněn usazeninami na povrchu výměníku, které vznikají v důsledku nečistot v odpadním proudu.

Tab. 2 Součinitel prostupu tepla různých kapalin [6]

Skupenství a vlastnosti tekutiny	Součinitel přestupu tepla α [W/m ² .K]
Voda ve formě kapaliny	5×10^3 až 1×10^4
Organická kapalina	$1,5 \times 10^3$ až 2×10^3
Plyn (P=1000 kPa)	$2,5 \times 10^2$ až 4×10^2
Plyn (P=100-200kPa)	80 až 5×10^2

Dalším klíčovým faktorem je skupenství proudu. Hustější tekutiny mají vyšší koeficienty prostupu tepla, který zaručuje vyšší rychlost při prostupu tepla na jednotku plochy pro daný teplotní rozdíl (viz tab. 2). Při návrhu výměníku je nutné brát v úvahu, jak bude materiál reagovat s proudem výfukových plynů, který může obsahovat množství různých chemikálií. V důsledku těchto reakcí mohou vznikat zmíněné usazeniny (viz obr. 5). Ty snižují účinnost výměníku a mohou zapříčinit selhání systému, v nejhorším případě i havárii. Existují ovšem opatření, která pomáhají těmto situacím předcházet, mimo jiné správná volba materiálu nebo použití čistících filtrů.



Obr. 5 Zanesený tepelný výměník [10]

2.2.4 Cena, dostupnost a další faktory

Zda je teplo vhodné pro danou aplikaci určuje několik dalších faktorů. Například pro menší projekty nemusí být využívání odpadního tepla tak výhodné, protože je nutné mít dostatečný kapitál pro realizaci a doba návratnosti může být podstatně delší. Pokud je zdroj tepla dostupný pouze po omezenou část dne, je tepelný výměník vystaven jak vysokým, tak nízkým teplotám. V tomto případě je třeba zajistit, aby byl materiál výměníku schopen odolávat únavě v důsledku tepelných cyklů. Navíc je nutné mít k dispozici další zdroj, který bude dodávat teplo v případě, že odpadní teplo nebude dostupné. Dalším faktorem je zdroj odpadního tepla. Pokud je proud v kapalně nebo plynné formě, je jeho transport a přenos tepla poměrně nenáročný. Naopak pokud jsou zdrojem pevné látky (ingoty, odlitky), které jsou většinou nosičem velkého množství energie, je velice náročné toto teplo přenášet a využívat ho.

2.3 Možnosti využití

Každý ze zdrojů odpadního tepla je vhodný k jinému způsobu využití. Například nelze používat spaliny ze vzduchového kompresoru o teplotě kolem 50 °C na předehřev pece pro výrobu železa. Proto je třeba nejprve zvážit, k čemu je zdroj vhodný, a teprve poté podnikat kroky k jeho využití.

Nejčastější způsoby využití odpadního tepla [11]:

1. **Výroba elektřiny** – odpadní teplo lze z průmyslových odpadních proudů získat pomocí organického Rankinova cyklu (ORC), použití média s nižší teplotou varu než u vody
2. **Výroba tepla a chladu** – nejčastěji za použití tepelných čerpadel, lze vytápět nebo klimatizovat různé administrativní budovy v okolí průmyslového podniku
3. **Trigenerace** – jedná se o kombinovanou výrobu elektřiny, tepla a chladu s možností využití jak v letních, tak v zimních měsících
4. **Předehřev** – odpadní teplo lze využívat na předehřev spalovacího vzduchu motorů, nebo pecí na výrobu kovů, a tím zvýšit jejich účinnost (viz tab. 3) a snížit spotřebu fosilních paliv

Tab. 3 Nárůst účinnosti pece s předehřátým vzduchem [6]

Teplota vzduchu v peci	Teplota předehřátého spalovacího vzduchu				
	204°C	316°C	427°C	538°C	649°C
1427°C	22%	30%	37%	43%	48%
1316°C	18%	26%	33%	38%	43%
1204°C	16%	23%	29%	34%	39%
1093°C	14%	20%	26%	31%	36%
982°C	13%	19%	24%	29%	33%
871°C	11%	17%	22%	26%	30%
760°C	10%	16%	20%	25%	28%

2.4 Metody využití odpadního tepla

Nejrozšířenějšími technologiemi, využívajícími odpadní teplo z průmyslových procesů, jsou tepelné výměníky, tepelná čerpadla a ORC jednotky (viz tab. 4). Méně obvyklé jsou tepelné trubice a termoelektrické generátory. Před samotným návrhem tepelného systému je třeba vzít v potaz faktory ovlivňující využitelnost odpadního tepla. Každá z technologií je vhodná pro jiné využití a potřebuje jiný zdroj tepla. Nejprve je tedy nutné zanalyzovat všechny dostupné informace a zohlednit dostupnost a vlastnosti tepla, celkové náklady na pořízení a provoz tepelného systému.

Tab. 4 Klasifikace technologií [1]

Technologie	Způsob využití	Forma (fáze) tepla	Teplota
Výměníky tepla (deskové)	přímé využití odpadního tepla od zdroje ke spotřebiči	plyn, vlhký vzduch, kapalina, pára	max. > 260 °C
Tepelná čerpadla	povýšení tepla na požadovanou hodnotu před využitím	všechny (v závislosti na použitém výměníku)	max. 140 °C
ORC	Převedení tepla na elektrickou energii (nepřímá energetická přeměna)	Všechny (v závislosti na použitém výměníku)	100-500 °C

2.4.1 Tepelné výměníky

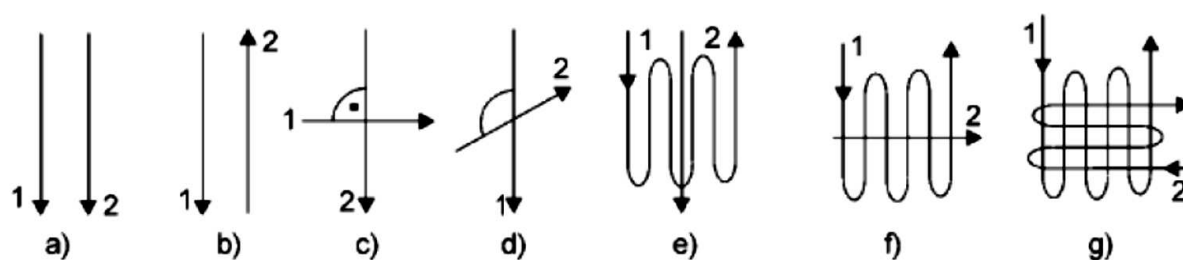
Tepelné výměníky patří za technologii, která je nejméně náročná, co se týká financí. Pokud je výměník správně navržen, dokáže využít velkou většinu energie z odpadního proudu. Nejvyužívanějším druhem je deskový výměník, většinou používány v kombinaci s nízkopotenciálním teplem. Jeho velkou výhodou je kompaktnost a velký výkon, kterého dosáhne díky velkým teplosměnným plochám [12]. Nevýhodou je koroze nebo zanesení při chemických reakcích mezi médii a materiálem výměníku. Potížím s korozí jde předejít díky použití plastových výměníků, které nekorodují a vyznačují se dlouhou životností. Tyto jsou omezeny maximální pracovní teplotou (105 °C) a tlakem (1 034,2 kPa), takže se uplatňují většinou při využívání tepla s nízkým potenciálem [1].

Druhy tepelných výměníků

Dle konstrukce a směru proudění média je možné výměníky rozdělit do několika skupin [13], [14], [15].

Rozdělení dle směru proudění (viz obr. 6):

- Souproudé** – směry proudění jednotlivých proudů jsou rovnoběžné, mají stejný směr
- Protiproudé** – směry proudění jednotlivých proudů jsou rovnoběžné, mají ovšem opačný směr
- Křížové** – směry proudění jsou na sebe kolmé
- Se šikmým vzájemným proudem** – osy proudů svírají v kolmém průmětu úhel větší nebo menší než 90 °
- Vícenásobně souproudé, protiproudé a křížové proudění**
- S kombinovaným prouděním**



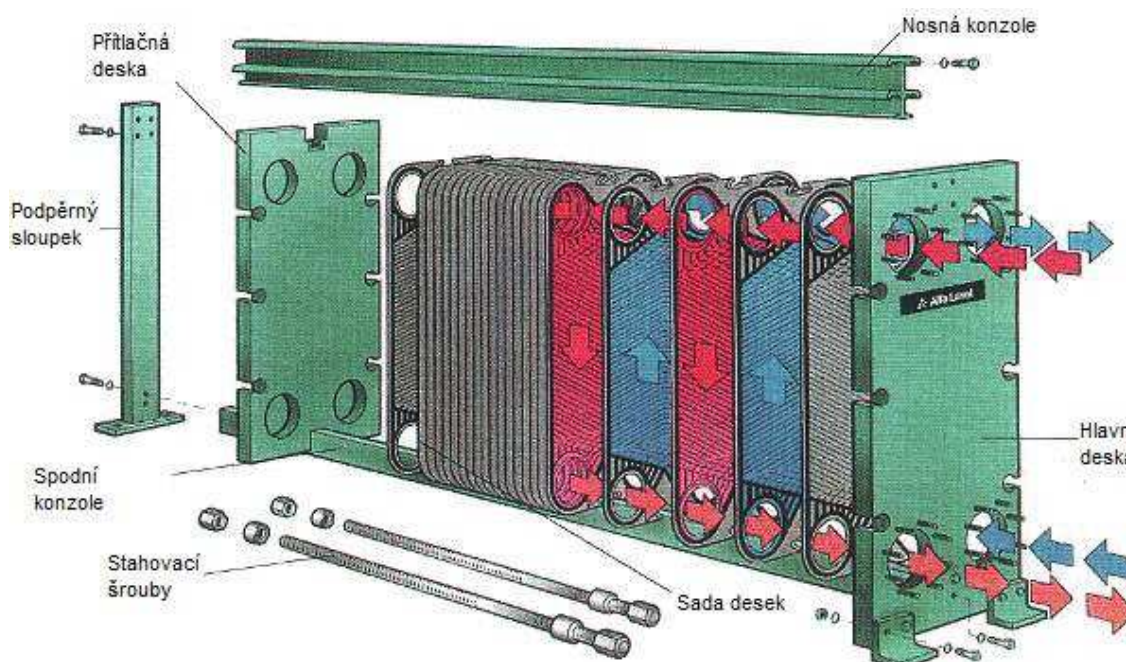
Obr. 6 Proudění ve výměnících [13]

a) souproud; b) protiproud; c) křížový proud; d) šikmý proud; e) až g) kombinované proudění

Rozdělení dle konstrukce výměníku:

1. Deskové výměníky

Tenké kovové desky, které jsou spojeny pájením nebo pomocí šroubových svorníků (viz obr. 7), tvoří teplosměnnou plochu výměníku tak, aby přestup tepla byl co nejvyšší ($3\,500$ až $7\,500\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ [16]). V prostoru mezi deskami je pak umístěno těsnění. Médium (téměř výhradně kapaliny) proudí v kanálcích, jež jsou vylisovány v jednotlivých deskách. Každý proud je veden vlastním kanálkem. Tento druh výměníku se vyznačuje kompaktností, snadným zvyšováním výkonu přiřazením dalších desek a čistým protiproudem v sousedních deskách. Nevýhodou je nutnost dosažení těsnosti při velkém tlaku a požadavek na větší čistotu média, abychom předešli zanesení.

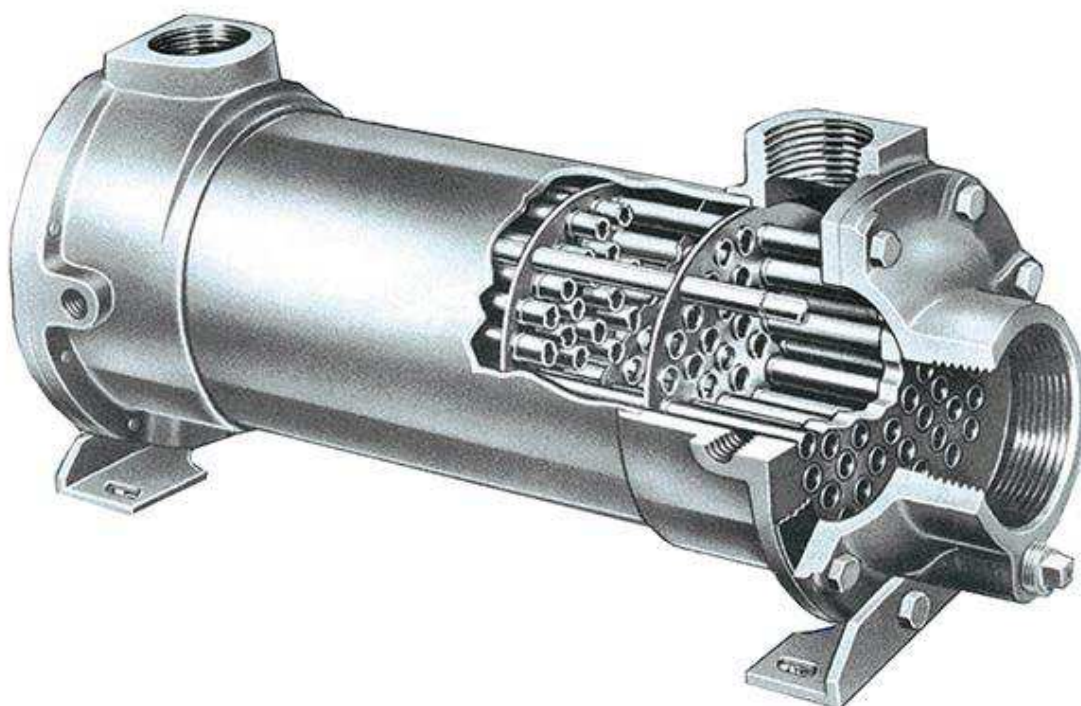


Obr. 7 Deskový výměník [17]

2. Trubkové výměníky

Jsou považovány za nejstarší a nejčastěji používaný typ. Jejich tvar je velice vhodný pro vyšší pevnostní namáhání. Celý výměník je složen z trubek, uložených uvnitř vnějšího pláště. Průtokový průřez mezi trubkami bývá 2–3x větší než průřez samotných trubek. Mezi trubkami jsou umístěny přepážky, které zpomalují průtok vnějšího média a tím prodlužují dobu pro přenos tepla. Trubkové výměníky se dělí na [18]:

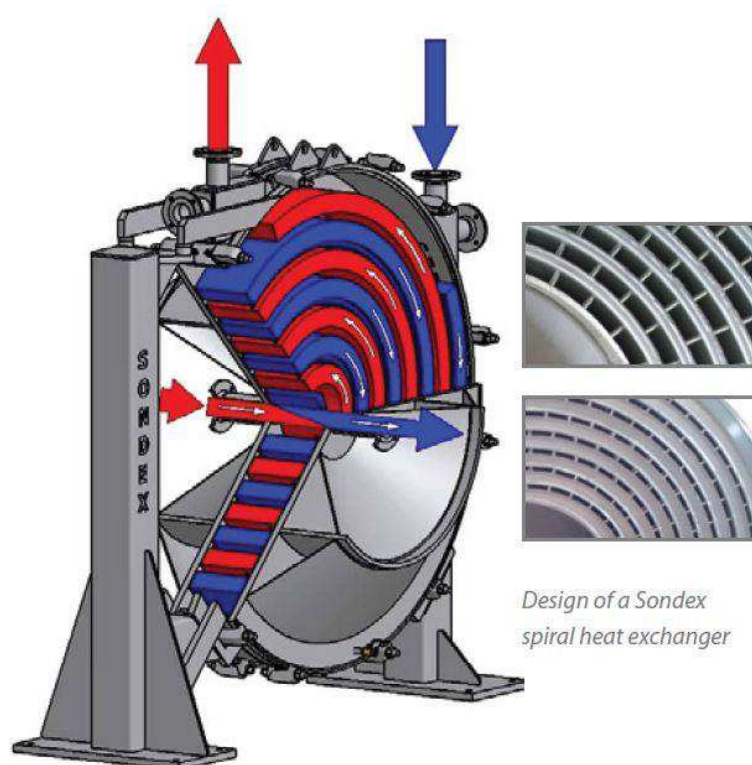
- Plášťové výměníky s rovnými trubkami (viz obr. 8)
- Dvoutrubkové výměníky
- Vlášenkové výměníky
- Výměníky se šroubovitě vinutými trubkami



Obr. 8 Plášťový výměník s rovnými trubkami [19]

3. Spirálové výměníky

Spirálové výměníky jsou ve skutečnosti zvláštním druhem deskových výměníků. Médium zde proudí v protisměru spirálově zakřivenými kanály (viz obr. 9). Zakřivení způsobuje vyšší intenzitu výměny tepla a snižuje riziko vzniku turbulencí [16]. Stejně jako u deskových výměníků je problém s možnými netěsnostmi a jsou omezeny vyššími tlaky. Hlavní předností jsou nízké tlakové ztráty a jen zřídka dojde k zanášení teplosměnných ploch. Díky těmto vlastnostem je možné použít spirálový výměník pro ohřev vláknitých materiálů v mnoha průmyslových oborech (papírenství, metalurgie a potravinářství).



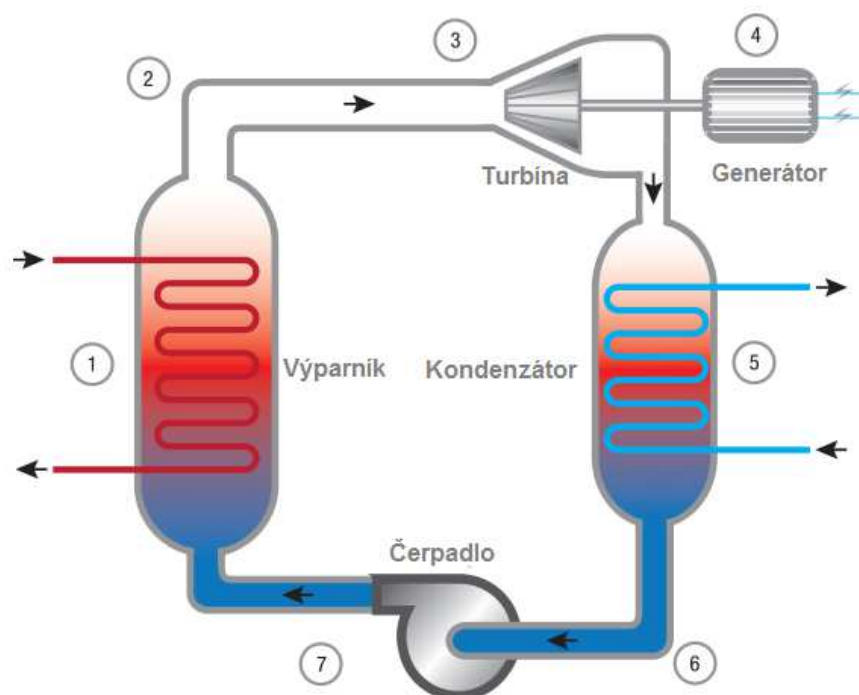
Obr. 9 Spirálový výměník [20]

2.4.2 Tepelná čerpadla

Pojem tepelné čerpadlo označuje energetické zařízení využívající teplo o nízkém potenciálu na vytápění budov a ohřev teplé užitkové nebo bazénové vody. Další možností využití je klimatizace, jelikož může být také zdrojem chladu pro ochlazení domu. Tepelná čerpadla většinou využívají tepelnou energii ve vzduchu, vodě a v půdě. Toto teplo o relativně nízké teplotě je transformováno na teplotu, při které jej lze využít. Podrobněji se tepelnými čerpadly zabývá kapitola 3.

2.4.3 ORC jednotky

Nejznámější technologií, která dokáže efektivně vyrábět elektrickou energii z odpadního tepla, je ORC jednotka (Organic Rankine Cycle). Tento cyklus pracuje v uzavřeném okruhu (viz obr. 10), který je složen z čerpadla, výparníku, kondenzátoru a turbogenerátoru. Uvnitř okruhu proudí organická kapalina o nízkém bodu varu (obvykle chladiivo nebo lehké uhlovodíky). Médium je čerpadlem vháněno do výparníku, kde vzniká tzv. organická pára, která se poté rozpíná v turbogenerátoru. V něm, stejně jako v klasické parní turbíně, dochází k přeměně tepelné energie na mechanickou a poté pomocí generátoru na elektrickou energii. Následně pára opět zkondenzuje v kondenzátoru a celý cyklus se opakuje. Při využití nízkopotenciálního tepla se účinnost ORC jednotek pohybuje v rozmezí 10 až 20 %. Nejčastější využití nachází při využívání odpadního tepla z bioplynových stanic [1].



Obr. 10 Schéma ORC jednotky [21]

2.4.4 Tepelné trubice

Tepelné trubice jsou využívány k přenosu tepla z jednoho místa na druhé pomocí par pracovní látky. Jedná se o hermeticky uzavřený kovový válec naplněný tekutinou. Trubice je jedním koncem zasazena do zdroje tepla a druhým do chladiče. Když pracovní látka (čpavek, voda) dosáhne požadované teploty, začne se odpařovat a proudit k ochlazenému místu, kde předá skupenské teplo do okolí a poté zkondenzuje. To se děje díky rozdílu tlaků mezi zdrojem tepla (vyšší tlak) a chladičem (nižší tlak). Díky tomu může trubice pracovat i v případě, kdy je kondenzátor níže než výparník [22]. Nejčastějším použitím je vytápění prostor a předehřev vzduchu.

2.4.5 Termoelektrické generátory

Jedná se o elektrické zařízení, které vyrábí elektrickou energii na základě rozdílu teplot. Tento princip se nazývá Seebeckův jev. Generátor pracuje na bázi polovodičových hranolů různého složení v závislosti na použitých teplotách. Díky přenosu tepelné energie se částice pohybují a tím vzniká elektrický proud. Účinnost těchto systémů se v současné době pohybuje mezi 2 až 5 %. Ovšem díky obrovským pokrokům v oblasti nanotechnologií je možné vyrobit termoelektrické materiály pracující s účinností 15 % nebo vyšší [1]. Generátory mohou například využívat odpadní teplo z elektráren na dodatečnou výrobu elektrické energie.

3. Tepelné čerpadlo

Jedná se o tepelné zařízení, které díky dodané práci transformuje tepelnou energii z nižší teplotní úrovně na vyšší. TČ pracuje na stejném principu jako chladicí zařízení (lednice, mrazáky). Je možné jej pokládat za částečný alternativní zdroj obnovitelné energie. Částečný proto, že pro práci je nutné dodat část elektrické energie získanou z jiného zdroje (převážně uhelná nebo jaderná elektrárna). Pokud je elektřina získána z jiného obnovitelného zdroje (voda, vítr, slunce), lze brát TČ jako zcela obnovitelný zdroj energie.

3.1 Parametry tepelného čerpadla

U tepelných čerpadel je při výběru nutné zohlednit několik důležitých parametrů, které vyjadřují energetickou efektivitu zařízení.

3.1.1 Topný faktor TČ

Jedním z nejdůležitějších parametrů TČ je topný faktor (COP – Coefficient of Performance), jenž udává účinnost tepelného čerpadla. Jde o teoretický poměr vyrobeného tepla a dodané energie. Nejčastěji se jeho hodnota pohybuje v intervalu od 2 do 5 [23]. Zjednodušeně lze topný faktor vypočítat z rovnice [24]:

$$\varepsilon_H = \frac{Q_H}{A_O} = \frac{T_H}{T_H - T_C} \cdot \eta_t \quad (3.1)$$

kde:

ε_H topný faktor [-]

Q_H teplo získané pro vytápění [J]

A_O energie dodaná pro pohon tepelného čerpadla [J]

T_H teplota, při které dochází ke kondenzaci chladiva v cyklu [K]

T_C teplota, při které dochází k odpařování chladiva v cyklu [K]

η_t účinnost termodynamického cyklu

Podmínky ovlivňující topný faktor [23]:

- Vstupní teplota zdroje – s rostoucí teplotou roste hodnota topného faktoru, pro běžnou praxi se teploty ochlazovaných látek pohybují kolem 0 °C
- Výstupní teplota z TČ – s klesající výstupní teplotou roste topný faktor, teplota většinou nepřesahuje 55 °C

3.1.2 Skutečný topný faktor TČ

Tepelné čerpadlo ve skutečnosti využívá elektrickou energii nejen na stlačení pracovního média, ale i pro provoz oběhových čerpadel, případně ventilátorů. U TČ se zemním kolektorem nebo s hlubinnými vrtly je spotřeba oběhových čerpadel relativně malá, ale nelze ji úplně zanedbat. Proto je nutné vypočítat takzvaný skutečný topný faktor z rovnice [25]:

$$\varepsilon_{Hg} = \frac{Q_H}{A_C + A_{aux}} \quad (3.2)$$

kde:

ε_{Hg} skutečný topný faktor [-]

Q_H teplo získané pro vytápění [J]

A_C energie dodaná pro pohon kompresoru [J]

A_{aux} energie dodaná pro pohon pomocných zařízení [J]

3.1.3 Chladicí faktor TČ

Chladicí faktor (EER – Energy Efficiency Ratio) je poměr množství tepla, které je odebráno z vnitřního prostředí, a energií dodanou tepelnému čerpadlu v režimu chlazení. Hodnota EER se zpravidla pohybuje mezi 2 až 4 [26] a je možné ji vypočítat z rovnice [25]:

$$\varepsilon_C = \frac{Q_C}{A_O} \quad (3.3)$$

kde:

ε_C chladicí faktor [-]

Q_C odvedené teplo [J]

A_O energie dodaná pro pohon tepelného čerpadla [J]

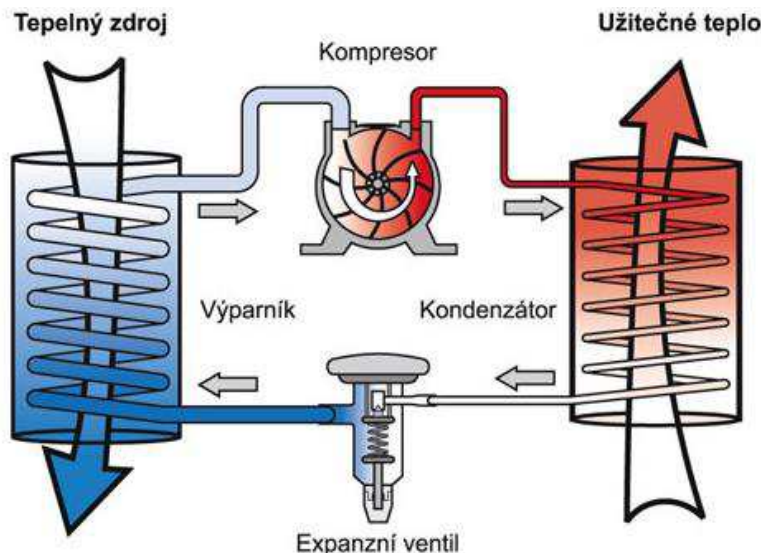
3.2 Druhy tepelných čerpadel

Existuje několik druhů TČ, které se rozdělují podle způsobu odsávání par z výparníku a zvýšení jejich tlaku. Dělí se na kompresorová (nejčastější), absorpční, plynová a hybridní.

3.2.1 Kompresorová TČ

Kompresorové TČ je složeno ze čtyř částí – výparník, kompresor, kondenzátor a expanzní ventil (viz obr. 11). Nepostradatelnou součástí je také chladivo, které umožňuje přenos tepla z okolního prostředí do topné soustavy. Nejčastěji se jako médium využívá nemrznoucí směs (nebo voda či vzduch), která proudí v kolektorech a odebírá teplo zdroji energie (vzduch, půda nebo voda). Chladivo, které musí mít nízkou teplotu varu (většinou nižší než 0 °C), při průchodu kolektorem ochlazuje okolní prostředí o několik °C a ve výparníku se díky odebranému teplu odpaří. Následně je pára stlačena v kompresoru na vysoký tlak a tím se jeho teplota ještě

zvýší. Poté chladivo putuje do kondenzátoru, kde předá teplo topné vodě a zkondenzuje. Nakonec tekuté chladivo pokračuje do expanzního ventilu, kde dojde ke snížení tlaku na původní hodnotu a celý cyklus se může opakovat.



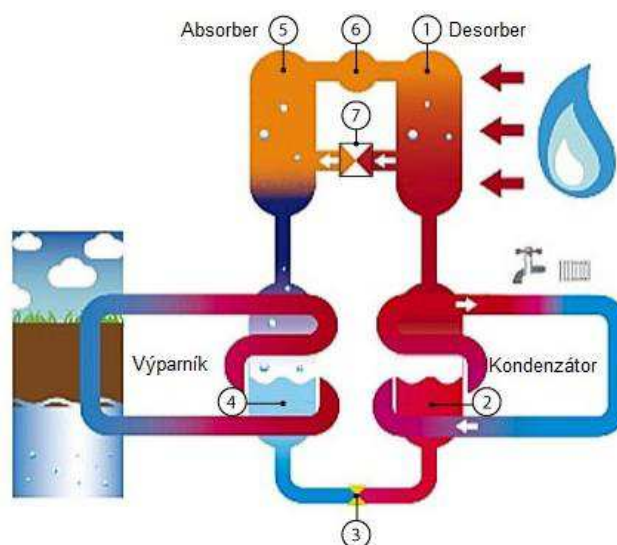
Obr. 11 Schéma kompresorového TČ [27]

3.2.2 Absorpční TČ

Absorpční TČ pracují na principu absorpce, kdy jedna látka absorbuje druhou, což má za následek tepelné a chemické změny ve směsi. Mezi nejpoužívanější média patří čpavek (NH_3) jako chladivo a voda (H_2O), která dokáže absorbovat páry čpavku.

Oběh TČ je složen z výparníku, absorbéru (pohlcovače), desorbéru (vypuzovače), kondenzátoru a expanzních ventilů (viz obr. 12). V desorbéru se dvojice pracovních látek s výrazně rozdílným bodem varu tepelnou cestou rozdělují, chladivo proudí přes expanzní ventil do kondenzátoru a výparníku, kde plní stejnou funkci jako v kompresorovém oběhu. Absorbent pokračuje přes expanzní ventil do absorbéru, kde se opět slučuje s parami chladiva z výparníku. Při této chemické reakci vzniká teplo, a proto je nutné absorbér chladit. Teplo je tedy získáváno nejen z kondenzátoru, ale i díky chlazení absorbéru. Směs chladiva a absorbentu se poté čerpá do desorbéru a tím dochází k uzavření absorpčního cyklu.

Směsi v desorbéru je třeba dodávat teplo a ohřát jej na teplotu, kdy dojde k odpaření chladiva a jeho transportu do kondenzátoru. Proto musí být zvolen vhodný zdroj tepla (např. elektrické topné těleso nebo plynový hořák).



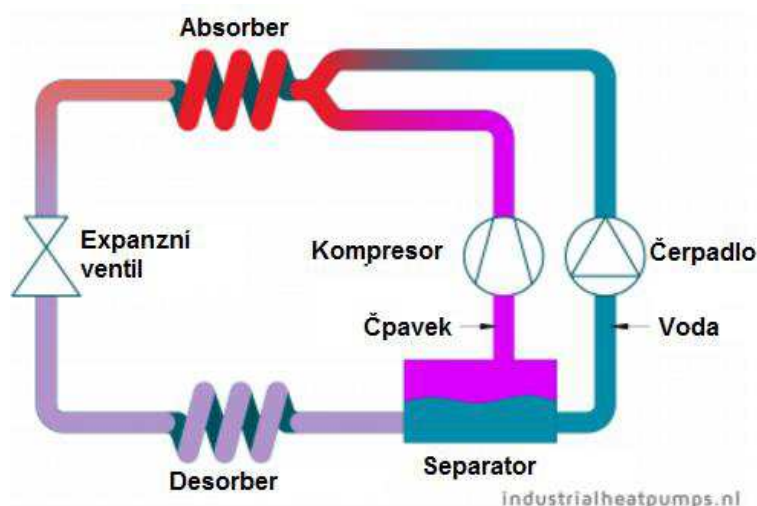
Obr. 12 Schéma absorpčního TČ [28]

3.2.3 Plynová TČ

Takzvané GHP jednotky (Gas Heat Pumps) jsou oproti klasickým kompresorovým čerpadlům značně hospodárnější. Pracují s vlastním zdrojem, který přímo přeměňuje palivo na mechanickou práci, což zajišťuje spalovací motor na zemní plyn. Koncepce GHP je efektivnější díky tomu, že při spalování je využita většina celkového potenciálu paliva. Část energie je přeměněna na mechanickou a ta je přímo převedena pomocí spojky na kompresor. Zbylá část (tepelná) energie, která je uložena v chladicí kapalině motoru a ve spalínách, není zmařena a je možné ji přidat k tepelnému výkonu okruhu s chladivem. Konstrukce plynového TČ je téměř stejná jako u elektrického TČ, pouze místo elektromotoru je na kompresor připojen plynový spalovací motor. Z tohoto důvodu je nutné také použít jiné druhy kompresoru (pístové nebo scroll kompresory).

3.2.4 Hybridní TČ

Hybridní TČ vznikne kombinací kompresorového a absorpčního oběhu. Místo výparníku je v systému umístěn desorbér a místo kondenzátoru je vložen absorbér (viz obr. 13). Opět se zde využívá směs médií, jako např. čpavek a voda. Kompresor dopravuje chladivo mezi absorbérem a desorbérem a absorbent proudí okruhem pomocí čerpadla nebo spolu ve směsi s chladivem díky kompresoru (tzv. mokrá komprese). U tohoto systému jsou kladeny vyšší požadavky na návrh a konstrukci kompresoru, proto se zařízení využívající mokrou kompresi objevují spíše ve zkušebních a výzkumných provozech. Změny ve složení směsi zapříčiněné absorpcí a desorpcí mohou způsobit kolísání teplot média.



Obr. 13 Schéma hybridního TČ [29]

3.3 Části kompresorového TČ

Kompresorová čerpadla patří k nejčastěji používaným typům. Jednotlivé části jeho pracovního okruhu jsou popsány v této kapitole.

3.3.1 Výparník

Jedná se o výměník tepla, zajišťující přenos tepla z okolí (vzduch, voda, země nebo odpadní proud) do chladiva, což způsobí jeho odpaření. Je důležité, aby byl správně zkonstruován, jelikož je namáhán tlakovým, chemickým a korozním působením.

3.3.2 Kompresor

Jednou z nejdůležitějších částí TČ je kompresor, jelikož bývá nejdražší částí a jeho výkon rozhoduje o ekonomice celého systému. Je nutné, aby byla dodržena úplná těsnost pracovního prostoru kompresoru, což znemožní chladivu uniknout do okolí.

Kompresory se podle konstrukce dělí na [30]:

- 1. Pístové** – plyn je ve válci stlačován pístem, hlučné, malý topný faktor, životnost okolo 15 let
- 2. Scroll kompresory** – plyn je stlačován pomocí dvou spirál, nejpoužívanější ve spojení s TČ, dobrý topný faktor, dražší, životnost cca 20 let
- 3. Rotační** – jen zřídka ve spojení s TČ, většinou v klimatizačních jednotkách, vhodné pro malé výkony, nízké topné faktory
- 4. Šroubové** – pro průmyslové a speciální aplikace, dosahují velkých výkonů, vysoká pořizovací cena

3.3.3 Kondenzátor

Jde o výměník tepla, v němž teplo z chladiva přechází do topného média (voda, vzduch). V průběhu přenosu chladivo zkondenzuje a pokračuje do expanzního ventilu. Konstrukce a materiál kondenzátoru bývají většinou stejné jako u výparníku.

3.3.4 Expanzní ventil

Expanzní ventil je důležitou částí TČ, která reguluje průtok chladiva do výparníku a tím řídí tepelný výkon. Ventil garantuje určitý výkon v kW/h a to tak, že propustí určitý průtok chladiva, aby bylo tohoto výkonu dosaženo. Aby bylo dosaženo tzv. vyváženého systému, je nutné propustit pouze takový objem chladiva, který dokáže kompresor stlačit. Také musí proběhnout tepelná výměna mezi chladivem a výměníky tepla. Pokud dojde k nerovnováznosti systému, je celý okruh ovlivněn.

3.4 Zdroje nízkopotenciálního tepla pro TČ

Nejvhodnějším zdrojem tepla je takový, jehož teplota se co nejvíce blíží požadované teplotě na výstupu. Cílem tedy je najít takový zdroj, který má co nejvyšší a nejstálější teplotu během celého roku. Existují také různé kombinace mezi typem zdroje tepla a média využitého pro vytápění (viz tab. 5).

Zdroje tepla, které jsou využívány pro získání energie, jsou [30]:

1. „Suché“ zemské teplo hornin (zemní „suché“ vrty)
2. Půdní vrstva (zemní kolektory)
3. Venkovní vzduch
4. Vnitřní vzduch (vzduch odváděný větracím systémem budovy)
5. Povrchová voda (vodoteče, nádrže, rybníky a jiné akumulace vody)
6. Podzemní voda (vrty, studnice, zavodněné šachty starých důlních děl)
7. Nízkopotenciální teplo z průmyslových procesů

Tab. 5 Nejčastější typy tepelných čerpadel [30]

Typ čerpadla (ochlazuje se/ohřívá se)	Možnost použití
Vzduch/voda	Univerzální typ, pro ústřední vytápění
Vzduch/vzduch	Doplňkový zdroj tepla, teplovzdušné vytápění, klimatizace
Voda/voda	Využití odpadního tepla, geotermální energie, teplovodní vytápění
Nemrznoucí kapalina/voda (země/voda)	Univerzální typ pro teplovodní vytápění, zdrojem tepla je nejčastěji vrt nebo půdní kolektor
Voda/vzduch	Teplovzdušné vytápěcí systémy

3.4.1 Teplo podloží

Díky žhavému zemskému jádru prostupuje velké množství energie k povrchu ve formě tepla. S přibývajícím hloubkou roste teplota podloží, obvykle o 1 °C každých 30 metrů. Průměrný tepelný tok (množství tepla, které projde jednotkovou plochou na zemském povrchu) na Zemi je $60 \pm 10 \text{ mW/m}^2$ [30]. Využitelnost tepla z podloží se řídí parametrem tepelné vodivosti hornin (viz tab. 6). Teplo se čerpá z vrtu hlubokého 50 až 150 metrů. Je možné použít i několik vrtů za předpokladu, že budou dostatečně vzdáleny od sebe, aby se zamezilo vzájemnému ovlivňování. Pro získání 1 kW výkonu TČ, je nutné mít k dispozici vrt o hloubce 12-18 metrů. Pro velký výkon je výhodnější vyhloubit jeden hluboký vrt než více kratších.

Po vyhloubení vrtu o průměru 130–220 mm se dovnitř umístí polyetylenová hadice, ve které proudí nemrznoucí směs. Poté je vrt utěsněn cementovou nebo jílocementovou směsí. TČ využívající tento zdroj energie má velmi vysoký topný faktor, který je po většinu roku neměnný. Jeho hodnota se pohybuje mezi 4–5. Je nezbytné, aby byl vrt správně dimenzován na požadovaný výkon. Pokud je příliš krátký a TČ odebírá velké množství tepla, je možné, že vrt zamrzne. Potom trvá velmi dlouho, než vrt rozmrzne a bude možné opět čerpat teplo z podloží.

Tab. 6 Parametry pro dimenzování hloubky vrtu [30]

Hornina	Tepelná vodivost	Měrný výkon	Hloubka vrtu pro tepelné čerpadlo s topným faktorem	
	[W/(m·K)]	[W/m]	3,0	3,5
			[m/kW]	[m/kW]
Suché nezpevněné horniny	< 1,5	20	33	36
Pevné horniny nebo vodou nasycené	1,5 až 3,0	50	13	14
Pevné horniny s vysokou tepelnou vodivostí	> 0,3	70	9,5	10
Štěrk, písky, suché	0,4	< 20	> 33	> 33
Štěrk, písky, zvodnělé	1,8–2,4	55–65	10–12	11–13
Hlíny a jíly, vlhké	1,7	30–40	17–22	18–24
Vápenec, masivní	2,8	45–60	11–15	12–16
Pískovec	3,4	55–65	10–12	11–13
Žuly	3,4	55–70	9,5–12	10–13
Čediče	1,7	35–55	12–19	13–20
Ruly	2,9	60–70	9,5–11	10–16

3.4.2 Půdní vrstva

Další možností, jak využít teplo ze země, jsou půdní kolektory. Polyetylenové potrubí, plněné nemrznoucí směsí, se uloží do země minimálně 20 cm pod místní zámraznou hloubku (0,5–3 m hluboko dle typu půdy a klimatických podmínek). Pokud jde o plošné kolektory, je nutné je pokládat dostatečně daleko od základů, aby nedošlo k jejich promrznutí. Velikost plochy, kterou je nutné pokrýt kolektory, je přibližně trojnásobek vytápěné plochy v domě (viz tab. 7). Spirálové kolektory se pokládají do větší hloubky, ovšem zabírají méně plochy, než plošný kolektor. Pokud je TČ určeno pouze k vytápění, není nutné, aby byl kolektor příliš velký, protože se okolní půda přes léto regeneruje okolním působením tepla.

Tab. 7 Parametry půdního kolektoru [30]

Druh půdy	Měrný výkon získaný z půdy	Plocha výměníků pro tepelné čerpadlo s topným faktorem		
	[W/m ²]	3,0	3,5	4,0
		[m ² /kW]	[m ² /kW]	[m ² /kW]
Suchá nezpevněná půda	10	66	71	75
Ulehlá vlhká půda	20–30	33–22	36–24	38–25
Vodou nasycené štěrky a písky	40	17	18	19

3.4.3 Venkovní vzduch

Dalším zdrojem nízkopotenciálního tepla je okolní vzduch. Jelikož se parametry TČ neustále zlepšují, je využívání tohoto zdroje stále častější, především v místech s mírnějším klimatem a nižším počtem mrazových dnů. Na rozdíl od ostatních typů zde není nutné použití žádných kolektorů, což má za následek nižší pořizovací náklady a jednodušší instalaci.

TČ obvykle sestává z venkovní a vnitřní části. Okolní vzduch je nasáván ventilátorem (viz obr. 14) a ochlazován, přičemž průtok bývá v řádech tisíců m³/h. Tepelná energie obsažená ve vzduchu je silně závislá na jeho vlhkosti. V porovnání s ostatními zdroji (voda, půda) není množství energie obsažené ve vzduchu přímo úměrné jeho teplotě. To znamená, že v zimě, kdy je teplota okolního vzduchu nejnižší a je nejvyšší potřeba tepla v domě, pracuje TČ s nejnižším topným faktorem a většinou i s částečně sníženým výkonem. V dnešní době existují TČ, která jsou schopna využívat vzduch o teplotách -12 až -15 °C. S ohledem na dny, kdy má okolní vzduch nižší teplotu, než s kterou je schopno TČ pracovat, je nutné vybavit topný systém dalším zdrojem, např. elektrokotlem. Dále je třeba počítat s možností namrzání venkovního výměníku. Proto jsou výměníky vybaveny různými systémy pro automatické odtávání námrazy, které ovšem zhoršují efektivitu TČ.



Obr. 14 Tepelné čerpadlo vzduch/voda [31]

3.4.4 Vnitřní vzduch

V případě, že je dům vybaven nuceným (strojním) větráním, je možné teplý odváděný vzduch z domu využívat pomocí TČ jako zdroj tepla. Teplota vzduchu uvnitř domu se pohybuje v relativně vysokých hodnotách (18–24 °C), což umožňuje TČ pracovat efektivně i při podmínkách, kdy nelze použít běžné rekuperační jednotky. Toto odváděné teplo je možné použít pro ohřev vody ústředního topení nebo pro ohřev vzduchu, pokud je objekt vytápěn teplovzdušně. Nevýhodou je, že na rozdíl od venkovního vzduchu je teplého větracího vzduchu značný nedostatek. Proto je u tohoto způsobu nutné přidat další zdroj nízkopotenciálního tepla (např. půdní kolektor). Další možností je bivalentní provoz domu a vybavení topné soustavy dalším zdrojem (např. elektrokotlem). Pokud jde o TČ typu vzduch/vzduch, je možné jej v letních měsících díky reverznímu chodu používat jako klimatizaci. Existují také systémy s integrovaným ventilátorem, které jsou schopny pracovat jako centrální větrací systém pro celý dům. Obvykle bývá umístěno mimo obytnou část (podkroví, sklep) a rozvody vzduchu jsou vedeny vzduchotechnickým potrubím. Tyto systémy slouží mimo jiné také k různým úpravám vzduchu (filtrování, zvlhčování atd.).

3.4.5 Povrchová voda

Povrchová voda není pro využívání pomocí TČ příliš vhodná, jelikož její teplota je v zimních měsících příliš nízká (cca 4 °C) a často je znečištěná. Nejvhodněji se jeví velké vodní nádrže, nebo trvale tekoucí vody, kdy se na dno umístí kolektor, který bude vodu ochlazovat. Naopak naprosto nevhodné pro využití jsou malé, zamrzající potoky, jelikož se teplota vody u dna v zimě pohybuje okolo 4 °C, což je hranice pro využití TČ. V tomto případě je třeba pokrýt kolektorem velkou plochu (35 m² vodní plochy na 1 kW výkonu). Protože je přístup k takovým možnostem značně omezen, je povrchová voda využívána jen výjimečně.

3.4.6 Podzemní voda

Jako nejlepší zdroj tepla pro využití pomocí TČ se jeví podzemní voda. Výhodou je vysoký průměrný roční topný faktor při nejmenších nákladech. To zaručuje relativně vysoká a celoročně stálá teplota podzemní vody, která se v hloubce 10 metrů pohybuje v rozmezí 8–10 °C. V určitých oblastech ČR (např. Krušnohorsko, Karlovarsko) je možné čerpat „termální“ vodu s teplotami blížícími se 20 °C. Pro využití podzemní vody je nutné mít na pozemku zdrojovou studnu s celoročně dostatečným objemem vody a vsakovací studnu, která vrací ochlazenou vodu do podloží. Dále je kladen důraz na to, aby nebyla voda příliš mineralizovaná, protože by se zvýšila možnost zanesení výměníků TČ.

4. Výpočet tepelného čerpadla

Praktická část se zabývá výpočtem návratnosti investice do tepelného čerpadla, které vytápí fiktivní administrativní budovu. Pro výpočet byla zvolena určitá pracovní doba a roční spotřeba tepla. Budova bude vytápěna tepelným čerpadlem společnosti MasterTherm, která patří k největším firmám na českém a evropském trhu.

4.1 Procento pokrytí z celkové spotřeby tepelným čerpadlem

Pro zadané hodnoty je zjištěno, jakou část z celkové roční spotřeby tepla administrativní budovy pokryje tepelné čerpadlo. Bylo zvoleno tepelné čerpadlo typu Mastertherm EasyMaster-75Z (A7W35) o výkonu 30,3 kW [32]. Celková roční spotřeba tepla v budově je 3 000 GJ. Hlavní výpočet bude pracovat s pracovní dobou 8 hodin denně, 5 dní v týdnu a s topnou sezónou 9 měsíců [33]. Pokud je použita pracovní doba pondělí-pátek, pak topná sezóna 2016/2017 obsahuje bez svátků 187 pracovních dní, kdy bude TČ v provozu. Celkový počet provozních hodin je tedy 1496 hodin. Všechny hodnoty po výpočet zobrazuje tab. 8.

Tab. 8 Zadané hodnoty pro výpočet 1 [32]

Roční spotřeba tepla (Q_o)	3000	GJ
Výkon TČ (P)	30,3	kW
Provozní hodiny (d)	1496	hod/rok
Hodin denně (12 měsíců)	4,09863	hod/den
Hodin denně (9 měsíců)	8	hod/den

Teplo vyrobené tepelným čerpadlem:

$$Q_{TČ} = P \cdot d = 30,3 \cdot 1496 = 45\,328,8 \text{ kWh} = 163,2 \text{ GJ} \quad (4.1)$$

Procento pokrytí z celkové spotřeby TČ:

$$P_{TČ} = \frac{Q_{TČ}}{Q_o} \cdot 100 = \frac{163,2}{3000} \cdot 100 = 5,44\% \quad (4.2)$$

4.2 Návratnost pro různé COP

Ze zadaných hodnot byla vypočtena návratnost investice do tepelného čerpadla pro několik různých COP. Pořizovací cena TČ byla zjištěna díky komunikaci s informačním centrem společnosti Mastertherm a jsou v ní započítány veškeré nutné součásti pro funkčnost systému a také celková instalace. Cena elektřiny se liší podle dodavatele a také místa v ČR. Hodnota, která je použita pro výpočet, je průměrnou cenou pro rok 2017 [34]. Cena teplé vody je brána pro topnou sezónu 2016/2017 ze stránek Tepláren Brno [35]. Pro výpočet je použita hodnota COP, která je dána dodavatelem u toho typu TČ. Další hodnoty jsou průměrné sezónní topné faktory (SCOP) a také hodnoty, které se blíží maximu, jenž COP u tepelných čerpadel dosahuje. U nízko teplotního provozu (35 °C) je SCOP 3,61 a u středně teplotního provozu (55 °C) nabývá hodnoty 2,92 [36]. Hodnoty použité ve výpočtu jsou zadány v tab. 9. Hodnoty návratnosti pro různé COP zobrazuje tab. 10 a graf 1.

Tab. 9 Zadané hodnoty pro výpočet 2 [34], [35]

Pořizovací cena (N_i)	490 000	Kč
Cena el. energie (C_{el})	3,71	Kč/kWh
Cena teplé vody (C_{TUV})	533,6	Kč/GJ
COP	4	[-]

Zisk z tepla:

$$Z_{QT\check{C}2} = Q_{T\check{C}} \cdot C_{TUV} = 163,1 \cdot 533,6 = 87\,074,8 \text{ Kč} \quad (4.3)$$

Náklady na elektrickou energii:

$$Z_{el2} = \frac{Q_{T\check{C}} \cdot C_{el}}{COP} = \frac{45\,328,8 \cdot 3,71}{4} = 42\,042,4 \text{ Kč} \quad (4.4)$$

Roční zisk:

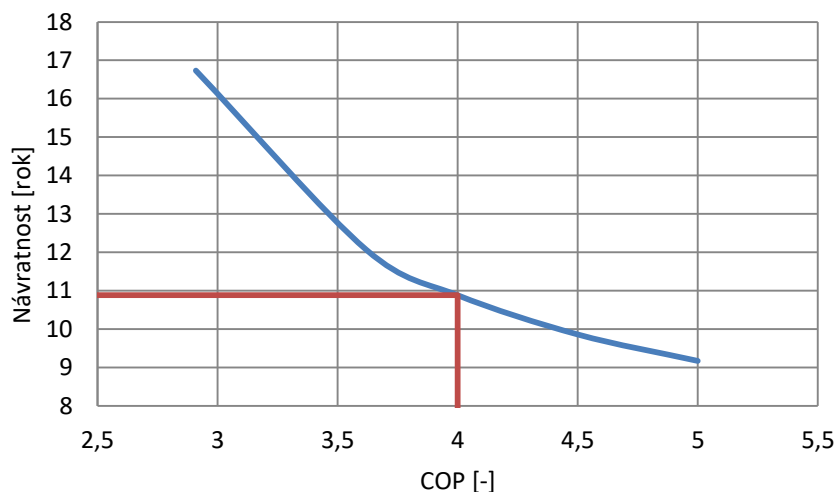
$$Z_{cel2} = Z_{QT\check{C}2} - Z_{el2} = 87\,074,8 - 42\,042,4 = 45\,032,4 \text{ Kč} \quad (4.5)$$

Návratnost investice:

$$T_2 = \frac{N_i}{Z_{cel2}} = \frac{490\,000}{45\,032,4} = 10,9 \cong 11 \text{ let} \quad (4.6)$$

Tab. 10 Vypočítané hodnoty pro různé COP

COP	2,91	3,62	4	4,5	5
Vyrobené teplo [kWh]	45328,8	45328,8	45328,8	45328,8	45328,8
Vyrobené teplo [GJ]	163,1	163,1	163,1	163,1	163,1
Zisk z tepla [Kč]	87074,8	87074,8	87074,8	87074,8	87074,8
Náklady na elektřinu [Kč]	57790,3	46455,7	42042,4	37371,0	33633,9
Roční zisk [Kč]	29284,49	40619,0	45032,4	49703,7	53440,8
Návratnost [rok]	16,7	12,2	10,9	9,9	9,2



Graf 1 Závislost návratnosti na COP

4.3 Návratnost pro různé pracovní doby

Dalším důležitým faktorem ovlivňujícím návratnost investice je počet provozních hodin TČ. Nejčastěji se počítá s osmihodinovou pracovní dobou. V některých provezech je možné, že se tepelné čerpadlo spustí např. 2 hodiny před začátkem pracovní doby, aby stihlo vytopit prostory a ohřát dostatek vody. Dále se počítá s 12 a 24 hodinovými směnami aby bylo možné lépe porovnat, jak tento parametr ovlivní návratnost. Hodnoty návratnosti pro další pracovní doby zobrazuje tab. 12 a graf 2.

Zisk z tepla:

$$Z_{QTČ3} = Q_{TČ} \cdot C_{TUV} = 163,2 \cdot 533,6 = 87\,074,8 \text{ Kč} \quad (4.7)$$

Náklady na elektrickou energii:

$$Z_{el3} = \frac{Q_{TČ} \cdot C_{el}}{COP} = \frac{45\,328,8 \cdot 3,71}{4} = 42\,042,4 \text{ Kč} \quad (4.8)$$

Roční zisk:

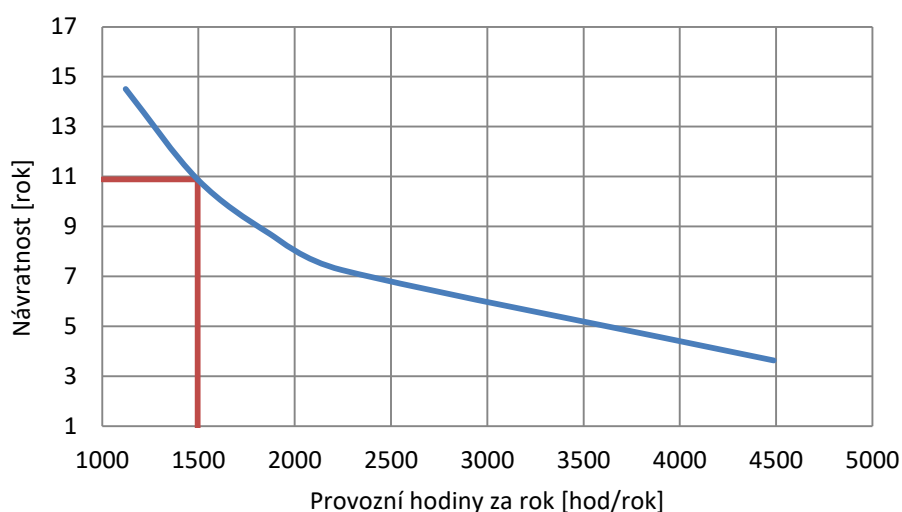
$$Z_{cel3} = Z_{QTČ3} - Z_{el3} = 87\,074,8 - 42\,042,4 = 45\,032,4 \text{ Kč} \quad (4.9)$$

Návratnost investice:

$$T_3 = \frac{N_i}{Z_{cel3}} = \frac{490\,000}{45\,032,4} = 10,9 \approx 11 \text{ let} \quad (4.10)$$

Tab. 11 Vypočítané hodnoty pro různé pracovní doby

Hodin denně	6	8	10	12	24
Provozní hodiny [hod/rok]	1122	1496	1870	2244	4488
Vyrobené teplo [kWh]	33996,6	45328,8	56661	67993,2	135986,4
Vyrobené teplo [GJ]	122,4	163,2	203,9	244,8	489,6
Zisk z tepla [Kč]	65306,1	87074,8	108843,5	130612,2	261224,4
Náklady na elektřinu [Kč]	31531,8	42042,4	52553,1	63063,7	126127,4
Roční zisk [Kč]	33774,3	45032,4	56290,4	67548,5	135097
Návratnost [rok]	14,5	10,9	8,7	7,3	3,6



Graf 2 Závislost návratnosti na provozní době

4.4 Návratnost pro různé pořizovací ceny

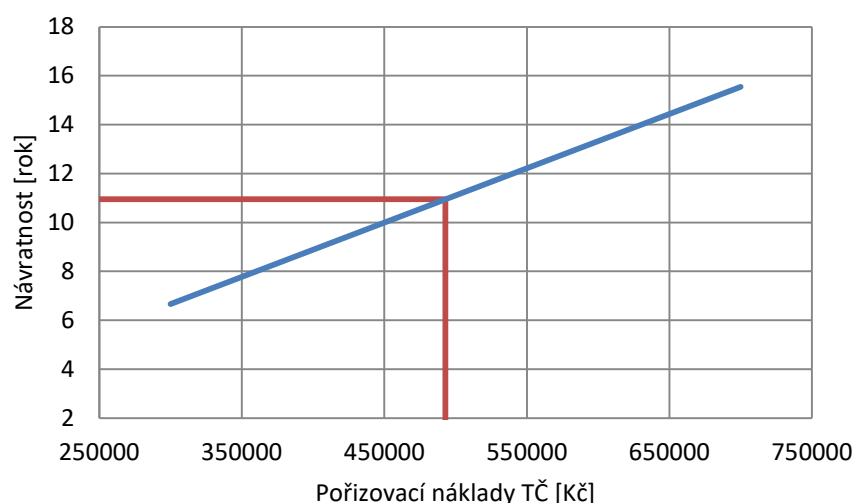
Parametrem, jenž je možné nejméně ovlivnit, je pořizovací cena. Samotná hodnota zvoleného TČ se pohybuje okolo 300 000 Kč. Jsou-li ovšem k ceně připočteny ostatní důležité součásti systému (akumulační nádrže, potrubí, oběhové čerpadlo atd.), výsledná cena rapidně vzroste. Střední hodnota ve výpočtu je výsledná cena pro konkrétní instalaci TČ jak v Kč, tak v EUR. Kurz použitý pro přepočtení na EUR je 26,66 Kč/EUR [37]. Ve výpočtu je použit roční zisk z výpočtu 2 pro osmihodinovou směnu a COP 4. Hodnoty návratnosti pro různé pořizovací ceny zobrazuje tab. 12 a graf 3.

Návratnost investice:

$$T_4 = \frac{N_{i4}}{Z_{cel2}} = \frac{490\,000}{45\,032,4} = 10,88 \cong 11 \text{ let} \quad (4.11)$$

Tab. 12 Vypočítané hodnoty pro různé pořizovací ceny

Pořizovací cena [Kč]	300000	400000	490000	600000	700000
Pořizovací cena [EUR]	11252,8	15003,8	18379,6	22505,6	26256,6
Návratnost [rok]	6,7	8,9	10,9	13,3	15,5



Graf 3 Závislost návratnosti na pořizovacích nákladech

4.5 Návratnost pro různé ceny elektrické energie

Cena elektrické energie se v průběhu roku mění, proto je nutné pro výpočet návratnosti použít průměrnou roční hodnotu. V dalším výpočtu je znázorněno, jak tato cena ovlivňuje dobu návratnosti investice do TČ. Pokud cena stoupne na příliš vysokou hodnotu, je výhodnější použít jiný zdroj tepla. Hodnoty návratnosti pro různé ceny elektrické energie zobrazuje tab. 13 a graf 4.

Náklady na elektrickou energii:

$$Z_{el5} = \frac{Q_{TČ} \cdot C_{el5}}{COP} = \frac{45\,328,8 \cdot 3,71}{4} = 42\,042,4 \text{ Kč} \quad (4.12)$$

Roční zisk:

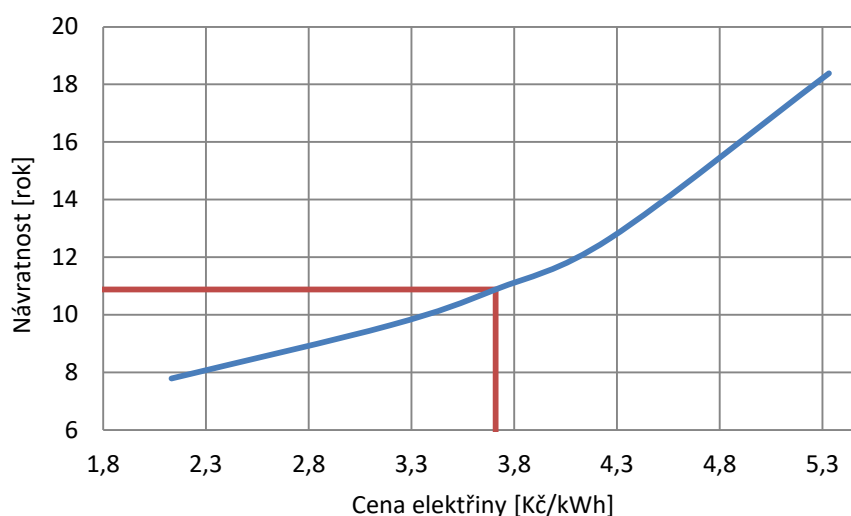
$$Z_{cel5} = Z_{QTČ2} - Z_{el5} = 87\,074,8 - 42\,042,4 = 45\,032,4 \text{ Kč} \quad (4.13)$$

Návratnost investice:

$$T_5 = \frac{N_i}{Z_{cel5}} = \frac{490\,000}{45\,032,4} = 10,9 \approx 11 \text{ let} \quad (4.14)$$

Tab. 13 Vypočítané hodnoty pro různé ceny elektrické energie

Cena elektřiny [EUR/kWh]	0,08	0,12	0,14	0,16	0,2
Cena elektřiny [CZK/kWh]	2,13	3,2	3,71	4,27	5,33
Náklady na elektřinu [Kč]	24169,3	36254	42042,4	48338,6	60423,3
Roční zisk [Kč]	62905,5	50820,8	45032,4	38736,2	26651,5
Návratnost [rok]	7,8	9,6	10,9	12,6	18,4



Graf 4 Závislost návratnosti na ceně elektřiny

4.6 Návratnost pro různé ceny teplé vody

Stejně jako u elektřiny je cena teplé vody proměnná jak v průběhu roku, tak v závislosti na oblasti odběru. Pro výpočet je použita průměrná hodnota ceny teplé vody. Dále se počítá s extrémně vysokou a nízkou cenou. Hodnoty návratnosti pro různé ceny teplé vody zobrazuje tab. 14 a graf 5.

Zisk z tepla:

$$Z_{QTČ6} = Q_{TČ} \cdot C_{TUV6} = 163,2 \cdot 533,6 = 87\,074,8 \text{ Kč} \quad (4.15)$$

Náklady na elektrickou energii:

$$Z_{el6} = \frac{Q_{TČ} \cdot C_{el}}{COP} = \frac{45\,328,8 \cdot 3,71}{4} = 42\,042,42 \text{ Kč} \quad (4.16)$$

Roční zisk:

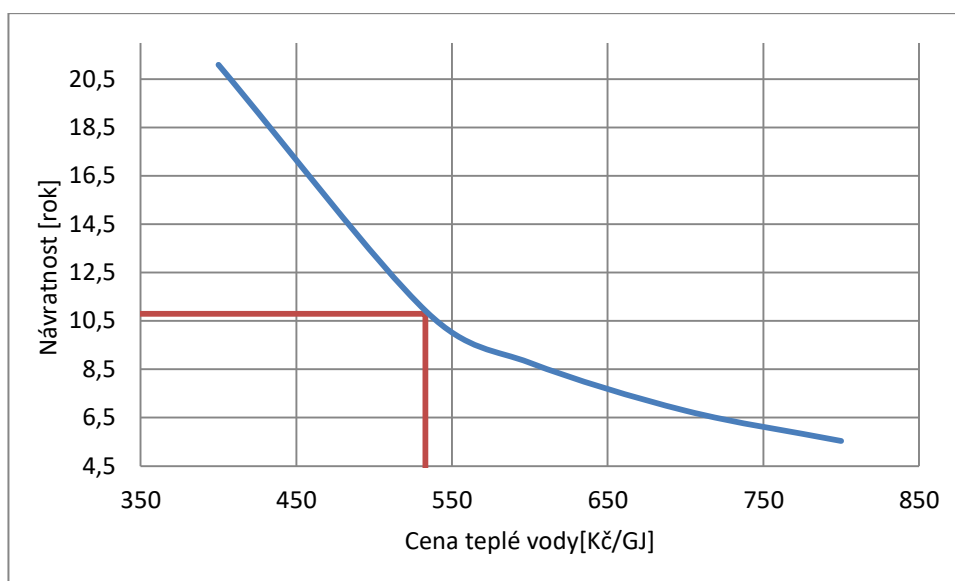
$$Z_{cel6} = Z_{QTČ6} - Z_{el6} = 87\,074,8 - 42\,042,4 = 45\,032,4 \text{ Kč} \quad (4.17)$$

Návratnost investice:

$$T_6 = \frac{N_i}{Z_{ce62}} = \frac{490\,000}{45\,032,4} = 10,9 \cong 11 \text{ let} \quad (4.18)$$

Tab. 14 Vypočítané hodnoty pro různé ceny teplé vody

Cena teplé vody [Kč/GJ]	400	533,6	600	700	800
Cena teplé vody [EUR/GJ]	15	20	22,5	26,3	30
Zisk z tepla [Kč]	65273,5	87074,8	97910,2	114228,6	130546,9
Náklady na elektřinu [Kč]	42042,4	42042,4	42042,4	42042,4	42042,4
Roční zisk [Kč]	23231,0	45032,4	55867,8	72186,1	88504,5
Návratnost [rok]	21,1	10,9	8,8	6,8	5,5



Graf 5 Závislost návratnosti na ceně teplé vody

4.7 Vyhodnocení výpočtů

Ve výpočtové části byly porovnány různé parametry ovlivňující návratnost investice do TČ. Přestože většinu těchto parametrů (pořizovací cena, cena teplé vody a elektřiny) nelze ovlivnit, je velice zajímavé pozorovat, jak se návratnost při jejich změnách liší.

Pro výpočet s průměrnými cenami elektrické energie a teplé vody vychází návratnost kolem jedenácti let. Mnoho dodavatelů garantuje dobu návratnosti zhruba 5 až 8 let. Naše tepelné čerpadlo pro tuto fiktivní instalaci nevyhovuje svou dobou návratnosti v porovnání s návratnostmi garantovanými dodavateli. Aby bylo možné dobu návratnosti razantněji snížit, je třeba zvýšit dobu provozu tepelného čerpadla. Například při desetihodinovém provozu denně je hodnota návratnosti o 2 roky kratší. Další možností je výběr čerpadla s vyšším COP, to by ovšem znamenalo vyšší pořizovací náklady. Navíc systémů dosahujících hodnoty COP 5 není na trhu mnoho. Po několika letech provozu je také nutné počítat s výměnou některých částí TČ a tedy s dalšími investicemi, které dobu návratnosti znovu zvyšují.

Nejvýhodnější situací pro instalaci TČ je zahrnutí nákladů do stavby nového domu, případně při výměně starého dosluhujícího kotle.

Pokud se budou brát v potaz jiné možnosti vytápění mimo výpočet, pak nejlepší návratnost vykazuje tepelné čerpadlo v případě, kdy je dům vytápěn elektrokotlem a je využíváno centrální zásobování teplem. Opticky nejhorší hodnoty návratnosti budou naopak vycházet při porovnání s vytápěním uhlím a dřevem. U těchto dvou případů je horší návratnost způsobena nezapočítáním času stráveného přípravou paliva a obsluhou kotle do ceny vyrobeného tepla. Pokud je tento čas započítán, vyjde návratnost tepelného čerpadla mnohem lépe.

5. Závěr

Hlavním tématem této bakalářské práce je využití odpadního tepla z procesů pomocí tepelného čerpadla. V rámci této práce jsou formulovány čtyři dílčí cíle. Prvním cílem je vysvětlit pojem odpadní teplo. Dalším úkolem je komplexně popsat technologii tepelného čerpadla. Posledním cílem je výpočet určitého parametru zvoleného čerpadla a následně porovnání se skutečným systémem.

V úvodní části je vypracována rešerše zabývající se popisem odpadního tepla. Je zde uvedeno rozdělení tepla do tří základních skupin dle jeho potenciálu. Dále jsou popsány faktory, jež zásadně ovlivňují využitelnost tepla. Poté se práce věnuje možnostem využití a také technologiím využívajícím toto teplo.

V další kapitole je kompletně popsána technologie tepelných čerpadel. Obsahuje také informace o několika základních parametrech tepelného čerpadla. Dále se kapitola věnuje rozdělení tepelných čerpadel dle jejich konstrukce a principu, jakým pracují. Nakonec jsou zde popsány zdroje, z nichž je možné čerpat teplo pomocí tepelného čerpadla.

Pro původně plánovaný experiment, jenž měl určit, za jakou dobu je tepelné čerpadlo schopné ochladit vnitřní objekt na požadovanou teplotu, bylo zjištěno, že čerpadlo svými parametry nedosahuje požadovaných hodnot pro realizaci a výsledky by vykazovaly značně zkreslené hodnoty. Experiment proto nakonec nebyl uskutečněn a byl nahrazen detailnějším výpočtem návratnosti investice do tepelného čerpadla pro vytápění administrativní budovy, kdy se kontrolovala závislost návratnosti na několika různých parametrech.

Je jasné, že v budoucnu bude nutné hledat nové zdroje energie kvůli klesajícím zásobám fosilních paliv. Proto je použití tepelných čerpadel k výrobě energie tolik žádoucí. Ve spojení s odpadním teplem, kterého je nejen v průmyslu obrovské množství, je to dokonalý způsob, jak zlepšit ekonomickou situaci a také stav životního prostředí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HAVLÁSEK, M., MÁŠA, V. *Využívání nízkopotenciálního odpadního tepla v průmyslu*. Energetika, 2016, č. 4/ 2016, s. 114-119. ISSN: 0375-8842.
- [2] Ministerstvo průmyslu a obchodu. *Tepelná čerpadla v roce 2013* [online]. Zveřejněno dne: 24. 6. 2014 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <www.mpo.cz/dokument150513.html>.
- [3] TZB-info. *V ČR je v provozu více než 70 000 tepelných čerpadel různých výkonů a systémů* [online]. Zveřejněno dne: 11. 3. 2016 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/13898-v-cr-je-v-provozu-vice-nez-70-000-tepelnych-cerpadel-ruznych-vykonu-a-systemu>.
- [4] Hobby.cz. *Z polských skleníků se dělá zbytečný problém, míní moravský pěstitel* [online]. Zveřejněno dne: 1. 3. 2016 [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <www.hobby.idnes.cz/pestovani-rajcat-polske-skleniky-dlk-/hobby-zahrada.aspx?c=A160229_110852_hobby-zahrada_bma>.
- [5] Brněnské vodárny a kanalizace, a.s. [online]. [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <www.bvk.cz/o-spolecnosti/odvadeni-a-cisteni-odpadnich-vod/cov-brno-modrice/>.
- [6] BCS Incorporated. *Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U. S. Industry, prepared for the U.S.* [online]. Department of Energy, Industrial Technologies Program. 2008 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <www1.eere.energy.gov/manufacturing/intensiveprocesses/pdfs/waste_heat_recovery.pdf>.
- [7] DATEL Ledec s.r.o. *Vytvrzovací pece a sušky* [online]. [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <www.datel-ledec.cz/vytvrzovaci-pace-a-susky>.
- [8] GALVAMET spol. s r.o. *HITEC plynová nitridace* [online]. [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: <www.galvamet.cz/sluzby/hitec-plynova-nitridace>.
- [9] Pavel Zubek. *Schmiedewerke Gröditz GmbH, Německo* [online]. [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <www.pavelzubek.cz/nejnovejsi/elektricka-obloukova-pec-524.html>.
- [10] Scopewe.com. *Fouling heat exchangers* [online]. Zveřejněno dne: 28. 6. 2014 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <www.scopewe.com/fouling-heat-exchangers/#more-494>.
- [11] Portál www.oenergetice.cz. *Využití odpadního tepla pro výrobu elektřiny, tepla a chladu* [online]. Zveřejněno dne: 27. 8. 2015 [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <www.oenergetice.cz/technologie/teplo/vyuziti-odpadniho-tepla-pro-vyrobu-elektřiny-tepla-a-chladu/>.
- [12] RODRIGUES L. H., E. NIE, A. RAZA a B. WRIGHT. *Low grade heat recovery* [online]. University of Pennsylvania, Department of Chemical and Biomolecular Engineering. [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://repository.upenn.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1014&context=cbe_sdr>. 2010>.
- [13] Katedra technických zařízení budov. *Výměníky tepla* [online]. Studijní text. Zveřejněno dne: 17. 4. 2011 [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <tzb.fsv.cvut.cz/files/vyuka/125yatm/prednasky/125yatm-06.pdf>.
- [14] BALÁŠ, M. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-3955-9.

- [15] OCHRANA, L. *Spalovací zařízení a výměníky tepla*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1993. ISBN 80-214-0529-5.
- [16] PETERA, K. *Výměníky tepla* [online]. Fakulta strojní ČVUT v Praze. Studijní text [cit. 2017-03.13]. Dostupné z: <pet.fsid.cvut.cz/petera/tv/tps_ex2.pdf>.
- [17] BCB Plzeň, spol.s r.o.. *Pájené výměníky tepla* [online]. [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <www.bcb-plzen.eu/alfalaval/pajene.htm>.
- [18] ROSYPAL, Š. *Výměníky tepla* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 32 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marek Baláš. Dostupné z: <www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29102>.
- [19] Bell & Gossett a xylem brand. *Straight tube heat exchanger – Small Coolers – CHX* [online]. [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <www.bellgossett.com/heat-exchangers/straight-tube-heat-exchangers/small-coolers-chx/>.
- [20] Heat Exchanger Sales & Engineering Co.. *Spiral heat exchangers* [online]. [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <www.heseco.com/spiral-heat-exchangers.htm>.
- [21] Calnetix Technologies. *Access Energy Thermapower Organic Rankine Cycle* [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <www.calnetix.com/access-energy-thermapower-orc-systems>.
- [22] KOTLÍK, V. *Heat pipe: princip a konstrukce* [online]. Svět Hardware. Zveřejněno dne: 1. 2. 2007. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <www.svethardware.cz/heat-pipe-princip-a-konstrukce/15941>.
- [23] EkoWaTT. *Tepelná čerpadla – energie prostředí* [online]. 2010 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <ekowatt.cz/upload/8d8404454da8be9d52d9234092c9d457/tepelna_cerpadla_web.pdf>.
- [24] MRAČKOVÁ, A. *Návrh a optimalizace tepelného čerpadla pro mateřskou školu* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 70 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D. Dostupné z: <www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=10793>.
- [25] MIKLAS, V. *Analýza účinnosti kaskády tepelných čerpadel* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 74 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vítězslav Máša, Ph.D. Dostupné z: <www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=126664>.
- [26] CMC Heating. *COP a ERR* [online]. [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <www.cmc-heating.cz/poradna/cop-a-err/>.
- [27] www.veiliawater2energy.com. *Investujte do tepelných čerpadel* [online]. [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <http://www.veoliawater2energy.com/cz/reference/tepelna-cerpadla/>.
- [28] The Heat Pump Association. *How do Heat Pumps Work?* [online]. [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <www.heatpumps.org.uk/HowDoHeatPumpsWork5.html>.

- [29] Industrial Heat Pumps. *How it Work – Hybrid heat pump* [online]. [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <www.industrialheatpumps.nl/en/how_it_works/hybrid_heat_pump/>.
- [30] SRDEČNÝ, Karel a Jan TRUXA. *Tepelná čerpadla*. Brno: ERA, 2005, vi, 68 s.il. ISBN 80-7366-031-8.
- [31] Stavebnictvi3000.cz. *Podlahové topení/chlazení za užití tepelného čerpadla vzduch-voda* [online]. Zveřejněno dne: 18. 6. 2014 [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <www.stavebnictvi3000.cz/clanky/podlahove-topeni-chlazení-za-uziti-tepelneho-cerpadla-vzduch-voda/>.
- [32] Master Therm tepelná čerpadla s.r.o. *Tepelné čerpadlo Easymaster* [online]. [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <www.mastertherm.cz/tepelne-cerpadlo-easymaster>.
- [33] Teplospol a.s. *Kdy začíná a končí topná sezóna* [online]. [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <<http://www.teplo spol.cz/cs/otazky-a-odpovedi/otazky-a-odpovedi/kdy-zacina-a-konci-topna-sezona.html>>.
- [34] Energie123.cz. *Cena 1 kWh* [online]. [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <www.energie123.cz/elektrina/ceny-elektricke-energie/cena-1-kwh/>.
- [35] Teplárny Brno, a.s. *Ceník tepla platný pro topnou sezónu 2016/2017* [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <www.teplarny.cz/cena-tepla>.
- [36] Master Therm tepelná čerpadla s.r.o. *Katalog Easymaster-2017* [online]. [cit. 2017-04-12] Dostupné z: <<http://www.mastertherm.cz/sites/default/files/downloads/easymaster-2017.pdf>>.
- [37] Kurzy.cz. *Kurzy měn* [online]. [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <www.kurzy.cz/kurzy-men/>.

SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

OBR. 1 VYTÁPĚNÍ SKLENÍKU ODPADNÍM TEPEM [4].....	13
OBR. 2 VYTVRZOVACÍ PEC [7].....	15
OBR. 3 NITRIDAČNÍ PEC [8].....	15
OBR. 4 ELEKTRICKÁ OBLOUKOVÁ PEC [9].....	16
OBR. 5 ZANESENÝ TEPELNÝ VÝMĚNÍK [10]	18
OBR. 6 PROUDĚNÍ VE VÝMĚNÍCÍCH [13]	21
OBR. 7 DESKOVÝ VÝMĚNÍK [17]	21
OBR. 8 PLÁŠŤOVÝ VÝMĚNÍK S ROVNÝMI TRUBKAMI [19]	22
OBR. 9 SPIRÁLOVÝ VÝMĚNÍK [20].....	23
OBR. 10 SCHÉMA ORC JEDNOTKY [21].....	24
OBR. 11 SCHÉMA KOMPRESOROVÉHO TČ [27]	27
OBR. 12 SCHÉMA ABSORPČNÍHO TČ [28]	28
OBR. 13 SCHÉMA HYBRIDNÍHO TČ [29]	29
OBR. 14 TEPELNÉ ČERPADLO VZDUCH/VODA [31].....	33
TAB. 1 ROZDĚLENÍ ZDROJŮ TEPLA DLE POTENCIÁLU [5], [6]	14
TAB. 2 SOUČINITEL PROSTUPU TEPLA RŮZNÝCH KAPALIN [6].....	17
TAB. 3 NÁRŮST ÚČINNOSTI PECE S PŘEDEHŘÁTÝM VZDUCHEM [6].....	19
TAB. 4 KLASIFIKACE TECHNOLOGIÍ [1].....	20
TAB. 5 NEJČASTĚJŠÍ TYPY TEPELNÝCH ČERPADEL [30]	30
TAB. 6 PARAMETRY PRO DIMENZOVÁNÍ HLOUBKY VRTU [30].....	31
TAB. 7 PARAMETRY PŮDNÍHO KOLEKTORU [30].....	32
TAB. 8 ZADANÉ HODNOTY PRO VÝPOČET 1 [32].....	35
TAB. 9 ZADANÉ HODNOTY PRO VÝPOČET 2 [34], [35]	36
TAB. 10 VÝPOČÍтанÉ HODNOTY PRO RŮZNÉ COP	36
TAB. 11 VÝPOČÍтанÉ HODNOTY PRO RŮZNÉ PRACOVNÍ DOBY	37
TAB. 12 VÝPOČÍтанÉ HODNOTY PRO RŮZNÉ POŘIZOVACÍ CENY.....	38
TAB. 13 VÝPOČÍтанÉ HODNOTY PRO RŮZNÉ CENY ELEKTRICKÉ ENERGIE	39
TAB. 14 VÝPOČÍтанÉ HODNOTY PRO RŮZNÉ CENY TEPLÉ VODY	40
GRAF 1 ZÁVISLOST NÁVRATNOSTI NA COP	36
GRAF 2 ZÁVISLOST NÁVRATNOSTI NA PROVOZNÍ DOBĚ	38
GRAF 3 ZÁVISLOST NÁVRATNOSTI NA POŘIZOVACÍCH NÁKLADECH	39
GRAF 4 ZÁVISLOST NÁVRATNOSTI NA CENĚ ELEKTŘINY	40
GRAF 5 ZÁVISLOST NÁVRATNOSTI NA CENĚ TEPLÉ VODY	41